Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 6, Feb.-Mar. 2022, p. 791-804

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۴۰۰، ص. ۸۰۴-۷۹۱

مقاله پژوهشی

بررسی کارایی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) به منظور ارزیابی بلندمدت تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای با کمک روش‌های ناپارامتری و GIS (مطالعه موردی آبخوان یزد- اردکان)

حسین سروی صدرآباد[1]- اصغر زارع چاهوکی[2*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

چکیده

بررسی روند زمانی و تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی متاثر از انتقال آب بین حوضه‌ای در مدیریت منابع آبی نقش مهمی دارد. هدف از این پژوهش، بررسی روند زمانی پارامترهای کیفی آب‌زیرزمینی با استفاده از آزمون من‌کندال و تخمین‌گر شیب سن و بررسی تغییر مکانی کیفیت آب زیرزمینی و تاثیرات انتقال آب بین‌حوضه‌ای می‌باشد. بدین منظور از پارامترهای کل جامدات محلول، کلر، سولفات، سدیم، کلسیم و منیزیم مربوط به ۴۳ چاه در دوره زمانی ۱۳۹۹-۱۳۷۹جهت بررسی روند زمانی و مکانی استفاده شد. نتایج بررسی روند زمانی نشان داد، پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته است، اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر دارای روند افزایشی بوده است و همه پارامترها به جز TDS، در دوره زمانی مورد بررسی بر اساس طبقه بندی سازمان بهداشت جهانی در حد مجاز قرار داشتند. نتایج رتبه‌بندی پارامترها نشان داد، TDS، کلر و منیزیم بیشترین تاثیر را بر کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان داشته‌اند و همچنین پارامتر منیزیم بیشترین و TDS کمترین تغییر را در بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ دارا بود. کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) در این پژوهش نشان داد که کیفیت کلی آبخوان یزد- اردکان، حتی با توجه به افت نسبتا زیاد آب‌زیرزمینی، در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در رده‌ی متوسط (۸۰-۶۰) و قابل قبول قراردارد و کاهش کیفیت در این دوره بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد،آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود. در انتها مشخص شد، تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده و به‌طورکلی توصیف کیفیت آب،امری دشوار است؛ بنابراین استفاده ازشاخص‌های کیفیت آب می‌توانند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طورخلاصه و قابل‌درک ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب، شاخص کیفیت آب زیرزمینی، شیب سن، من‌کندال، یزد- اردکان

مقدمه

آبخوان‌ها، یک ذخیرهٔ مهم آب برای کاربردهای مختلف به شمار می‌رود، به‌طوری‌که در بخش‌های زیادی از کشورمان به دلیل عدم دسترسی به آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی در تأمین آب مصرفی برای بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت نقش اساسی را ایفا می‌کند. اما افزایش روزافزون آلاینده‌های شیمیایی شهری و صنعتی، شیوه‌های نوین کشاورزی و حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بدون توجه به توان آبخوان‌ها تهدیدی جدی برای محیط‌زیست به حساب می‌آیند و سبب شدند، عدم وجود آب با کیفیت مناسب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به یک بحران جدی تبدیل شود. به طوری‌که متولیان امر را بر آن داشته تا انتقال آب بین‌حوضه‌ای جهت رفع نیاز مناطق کم آب را در اولویت کاری خود قرار دهند. اما به دلیل عدم جامع‌بینی، این امر موجب ایجاد تنش‌هایی مابین مناطق مبدا و هدف شده که توجه بیشتر به کیفیت منابع آب‌زیرزمینی در مناطق خشک جهت خودکفایی و نیاز کمتر به آب‌های انتقالی را بسیار حیاتی کرده است. از طرفی تقاضا برای حرکت به سمت توسعه پایدار مهمترین

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی
۲- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
(*- نویسنده مسئول: Email: zare.chahouki@yazd.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71571.1073

چالش فراروی جامعه بشری در قرن بیست و یکم است. در این راستا از یک‌سو دسترسی به منابع آب کافی با کیفیت مطلوب را اولین شرط دستیابی به توسعه پایدار مطرح می‌کنند و از سوی دیگر، فقدان منابع آب را مهمترین عامل عدم دستیابی به توسعه پایدار و به تبع آن استقرار پایدار جمعیت می‌دانند (۲، ۱۸ و ۳۲).

اگرچه مفهوم کیفیت آب‌زیرزمینی واضح به نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد (۴ و ۵). ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، مقیاسی از تناسب آن به عنوان منبع آبی برای مصارف انسانی و حیوانی، آبیاری و برای اهداف صنعتی و غیره را شامل می‌شود. بنابراین، هدف، تعریف کیفیت آب نیست، بلکه استفاده مطلوب از آب در جامعه، مورد نظر متخصصان است (۷ و ۱۱). بر این اساس استانداردهای مختلفی برای هر متغیر تعریف شده است که اگر آب از این استاندارد تجاوز کند، قبل از استفاده باید تصفیه شود (۶). سازمان بهداشت جهانی (WHO)، به عنوان یکی از سازمان‌های متولی این امر، استانداردهایی از غلظت یون‌ها در آب آشامیدنی معرفی کرده‌است. همچنین جهت اعلام و یا مقایسه کیفیت آب در مناطق مختلف، شاخص‌هایی بر اساس میزان پارامترهای کیفیت آب مطرح شده که شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) یکی از این شاخص‌هاست. این شاخص از جمله شاخص‌هایی است که بر پایه GIS استوار است و جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی می‌توان از آن استفاده کرد. این شاخص توسط بابیکر و همکارانش (۴) به منظور استنباط بهتر از غلظت یون‌های اصلی از کل سطح منطقه ارائه شد.

به منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی علاوه بر بررسی مکانی کیفیت آب، بررسی روند زمانی کیفیت جهت آگاهی از شرایط آبخوان‌ها و مدیریت صحیح و با برنامه نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به منظور بررسی و تحلیل روند سری زمانی، تاکنون روش‌های متعددی ارائه گردیده‌است که این روش‌ها به دو دسته پارامتری و ناپارامتری قابل تقسیم می‌باشند. روش‌های ناپارامتری از کاربرد وسیع‌تری نسبت به روش‌های پارامتری برخوردار می‌باشند. آزمون من‌کندال از روش‌های ناپارامتری می‌باشد که ابتدا توسط من (۲۰) ارائه و سپس توسط کندال (۱۷) توسعه یافت. در روش‌های ناپارامتری اساس کار بر تفاوت داده‌های مشاهداتی است به گونه‌ای که این روش‌ها مستقل از توزیع آماری سری‌های زمانی بوده و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی و کشیدگی زیاد دارند مناسب‌تر از روش‌های پارامتری می‌باشند. ترکیب نتایج حاصل از بررسی‌های مکانی و زمانی می‌تواند ما را در جهت مدیریت درست و آگاهی از مشکلات و مسائل پیش‌رو یاری دهد و گرایش و مسیر حرکت کیفیت منابع آب در مناطق مختلف را تعیین کند.

طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص کیفیت منابع آب زیرزمینی و تحلیل و تفسیر آن صورت گرفته‌است. خسروی و همکاران (۱۹) به مطالعه تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از GQI پرداختند. نتیجه نشان داد، سه پارامتر مواد جامد محلول، سدیم و کلر با داشتن بیشترین ضریب رتبه‌بندی به ترتیب دارای بیشترین تاثیر در مقدار شاخص GQI و در نتیجه کیفیت آب زیرزمینی هستند. همچنین روند شاخص GQI در منطقه مورد مطالعه نزولی است و کاربری اراضی نقش بسیار زیادی در کاهش میزان کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان دارد. پارسایی و همکاران (۲۴) مطالعه‌ای جهت بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب و کشاورزی در دشت قروه در استان کردستان با استفاده از داده‌های سالانه ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ انجام دادند. نتایج به دست‌آمده در مورد کیفیت آب‌های زیرزمینی ازنظر شرب و کشاورزی نشان داد که مساحت مناطق دارای کلاس‌های مناسب‌تر در حال کاهش و مساحت مناطق دارای کلاس‌های نامناسب در حال افزایش است. نورکی و هوشمند (۲۳) طی مطالعه‌ای به بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و روش‌های درون‌یابی در دشت همدان بهار پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی، روش RBF نسبت به روش‌های دیگر برتری داشت و از دقت بالا و خطای پایینی برخوردار بوده است لذا درون‌یابی با این روش صورت گرفت. در پایان مقایسه نقشه‌های پهنه بندی مکانی شاخص WQI نشان داد که در ابتدا و انتهای دوره آماری ۱۰ ساله مورد بررسی میزان شاخص در کل سطح دشت یک روند کاهشی دارد. ناصری و همکاران (۲۲) از یک رویکرد مکانی-زمانی کریجینگ برای بررسی الگوی کیفی حاکم بر تالاب بامدژ بر اساس چند شاخص کیفیت آب استفاده کرد. سبزواری و زینی‌وند (۲۶) اخیرا در دشت بروجرد- دورود با روش ناپارامتری من‌کندال و شاخص ذکر شده به بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی پرداخته و قدرت ارزیابی روش‌های ناپارامتری در روندیابی فاکتورهای کیفی را مناسب ارزیابی کردند.

همچنین گرزیونا و همکاران (۱۳)، ژنگ و همکاران (۳۵)، سان و همکاران (۲۹)، البابا و همکاران (۱۰)، ابراهیم (۱۶)، دشتی برمکی و همکاران (۷)، سبزواری و زینی‌وند (۲۵)، دوست محمدیان و همکاران (۹)، یونسی و همکاران (۳۴)، محمدی و همکاران (۲۱)، علیپور و همکاران (۲) و ترابی پوده و همکاران (۳۰) روند زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی را از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند.

اقلیم و بارش ناچیز استان یزد و شرایط کم‌آبی و بحران آب در این استان سبب شده تا به عنوان مقصد انتقال آب بین حوضه‌ای تلقی شود. اما از طرفی بحث صنعت و اشتغال نیز در این استان رونق دارد و استانی مهاجرپذیر محسوب می‌شود. پس بررسی کیفیت آب‌زیرزمینی و ارزیابی تاثیرات عوامل مختلف بر آبخوان‌ها در مقیاس زمانی و مکانی مختلف امری مهم می‌باشد. برای بررسی روند زمانی و مکانی

و همچنین تعیین کیفیت منابع آب زیرزمینی، روش‌ها و شاخص‌های متنوعی معرفی و توسعه داده‌شده است، که هرکدام از این روش‌ها از فاکتورهای مختلف، برای ارزیابی کیفیت آب بهره می‌گیرند. پژوهش‌های مرتبط نشان داد، استفاده از هر کدام از این معیارها به‌تنهایی نمی‌تواند گویای وضعیت و گرایش کیفیت منابع آب زیرزمینی باشد.

بر اساس نتایج و دهقان و همکاران (۱۳۹۹) علارغم ورود آب سرچشمه‌های زاینده‌رود در دهه ۹۰–۸۰ به دشت یزد اردکان که به عنوان آب شرب و صنعت مصرف می‌شود (اواخر اسفند ۱۳۹۷)، تراز ارتفاعی آب نسبت به دهه قبل با کاهش ۱۰۰ متری مواجه بوده است که وجود خشکسالی و برداشت بی‌رویه را می‌توان دلیل کاهش تراز ارتفاعی دانست. این کاهش تراز در ناحیه شمالی دشت که کویر سیاه‌کوه می‌باشد به ۱۰۰ متر بالغ می‌باشد. همچنین عمق برخورد به آب در چاه‌های دشت، در دو دهه نیز از شمال به جنوب در حال افزای می‌باشد به‌طوری‌که عمق برخورد نسبت به یک دهه قبل به میزان ۱۰ متر افزایش داشته‌است. بیشترین میزان برخورد آب در چاه‌ها در قسمت جنوبی (اطراف شیرکوه) و کمترین مربوط به بخش شمالی (حاشیه کویر سیاه‌کوه) می‌باشد. طبق هیدروگراف آب زیرزمینی تراز دشت از ۱۱۶۶ متر در سال ۷۰ به ۱۰۴۳ متر در سال ۹۰ کاهش یافته که حاکی از بیلان منفی مداوم در دشت می‌باشد.

تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی روند کیفیت آب زیرزمینی در دو مقیاس زمانی و مکانی در مناطق خشک ایران و بررسی ارتباط آن با انتقال آب گزارش نشده است. از این‌رو پژوهش حاضر، به بررسی روند تغییرات زمانی با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری و همچنین تعیین تغییرات مکانی مشخصه‌های کیفی مختلف منابع آب زیرزمینی دشت یزد– اردکان و طبقه‌بندی کیفیت کلی دشت با استفاده از شاخص GQI پرداخته‌است. همچنین با استفاده از مقایسه نقشه‌های سال ابتدایی و انتهایی آمار و استفاده از فرمول‌های ریاضی به تعیین میزان درصد تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی پرداخته شد، به‌طوری‌که با این تکنیک می‌توان گرایش کیفیت آب در مناطق مختلف را تعیین و از مکان‌های در خطر آگاهی کسب کرد. همچنین می‌توان با بهره‌گیری از این تکنیک‌ها از تاثیرات مثبت و منفی آب‌های انتقالی بین حوضه‌ای اطلاعات ارزشمندی کسب کرد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

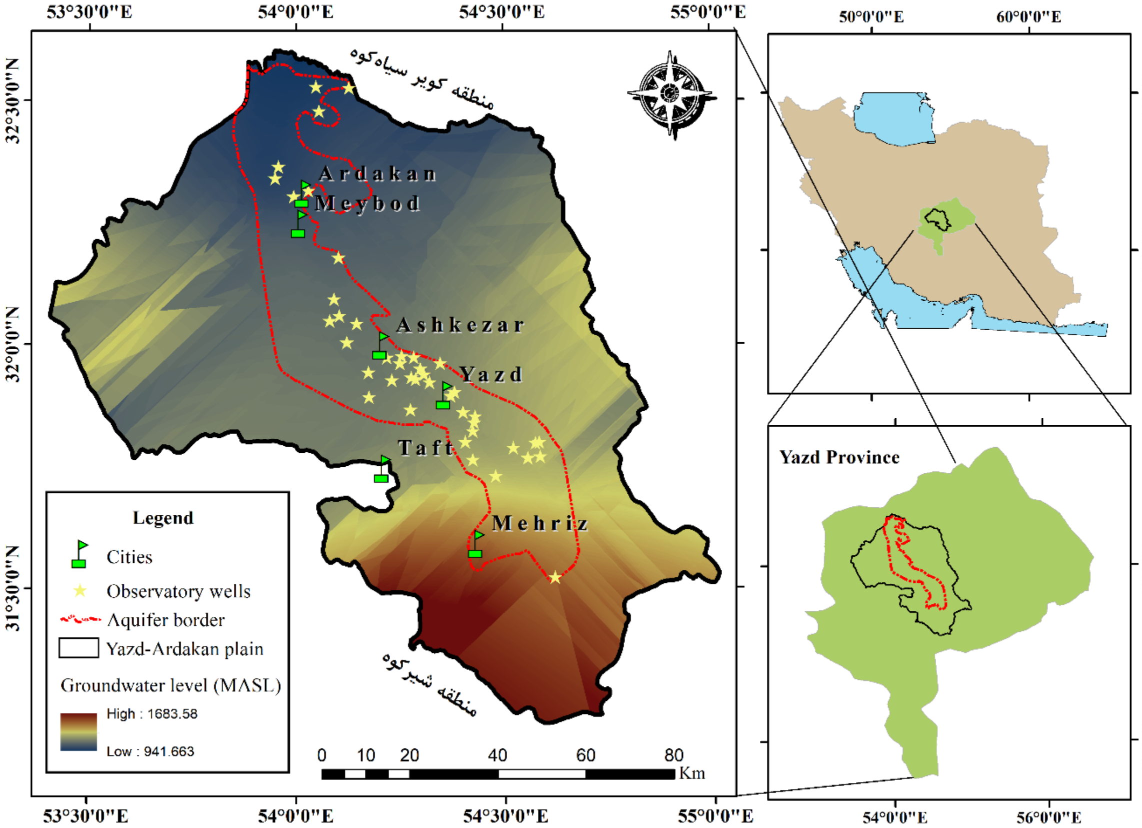
آبخوان یزد– اردکان در وسط دشت از شمال تا جنوب کشیده شده و دارای مساحتی حدود ۲۶۱۲/۲۷ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۲۲/۵ درصد از دشت یزد– اردکان را شامل می‌شود و اکثر چاه‌های مشاهداتی، برداشتی و حتی پیزومتر در محدوده آبخوان می‌باشد. شکل ۱ نقشه تراز آب زیرزمینی دشت، موقعیت آبخوان و چاه‌های مورد بررسی در استان و کشور می‌باشد.

طبق نتایج دهقان و همکاران (۸) چاه‌ها در دشت یزد- اردکان بیشتر روی سازندهای آبرفتی واقع شده‌اند. همچنین سازندهای آبرفتی بیشترین تأثیر را بر آب چاه‌های دشت دارند. پس از آن سازند آهکی کرتاسه تأثیرگذاری بیشتری بر آب چاه‌ها دارد زیرا در جهت جریان آب گسترش بیشتری داشته است. پس از سازندهای ذکرشده مهمترین سازندها و سنگ‌ها در دشت مورد مطالعه می‌توان به قرمز بالایی، سلطانیه و آندوزیت اشاره کرد. ورودی آب‌های زیرزمینی به دشت، در بخش جنوبی از ارتفاعات شیرکوه و خروجی در قسمت شمالی در ابتدای حوزه سیاهکوه بوده و جهت عمومی آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال می‌باشد (۱). بیشترین تراز آب زیرزمینی ۱۶۸۳ متر از سطح دریا در جنوب دشت و کمترین تراز ۹۴۱ متر از سطح دریا در شمال دشت قرار دارد و از شمال به جنوب افزایش می‌یابد.

مطالعات طرح انتقال آب از زاینده‌رود به یزد از سال ۶۳ آغاز و سپس عملیات اجرایی آن از سال ۱۳۷۳ شروع گردید و بهره‌برداری از این طرح عظیم از سال ۱۳۷۹ آغاز گردید. بر همین اساس شروع دوره آماری مورد بررسی در این پژوهش از سال ۱۳۷۹ می‌باشد. با اجرای این طرح سالانه ۷۸ میلیون متر مکعب آب از زاینده‌رود انتقال می‌یابد. انتقال آب از محل آبگیر تا مخازن شحنه یزد به طول ۳۳۳ کیلومتر به صورت ترکیبی از سیستم ثقلی و پمپاژ همراه با ۱۰ مخزن ذخیره و فشارشکن ۵۰۰۰ متر مکعبی در طول مسیر و ۴ مخزن ذخیره ۲۰۰۰۰ مترمکعبی در شحنه یزد صورت می‌گیرد.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، بررسی روند تغییرات زمانی منابع آب زیرزمینی دشت یزد– اردکان با آزمون‌های ناپارامتری من‌کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام گردید و جهت بررسی روند مکانی و ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت از طریق روش‌های درون‌یابی مناسب و شاخص کیفی منابع آب زیرزمینی (GQI) استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده ۵۰ چاه شناسایی شد که دارای اطلاعات کیفی آب زیرزمینی در محدوده مورد نظر بود اما با بررسی دوره زمانی آن‌ها و همچنین بررسی نقص‌های آماری در نهایت ۴۳ چاه انتخاب گردید که دارای دوره زمانی حدودا نزدیک به هم با اطلاعات تقریبا کامل بودند. این اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت گردید و شامل یون‌های کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، کلر (Cl^{-})، سولفات ($SO4^{2-}$) و کل جامدات محلول (TDS) می‌باشد که در همه چاه‌ها دوره زمانی برابر (۱۳۷۹–۱۳۹۹) در نظر گرفته‌شد.



شکل ۱- نقشه تراز آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان و موقعیت چاه‌های مشاهداتی و آبخوان این دشت در استان و کشور

Figure 1- Groundwater level map of Yazd-Ardakan plain and location of observatory wells and aquifer

با توجه به اطلاعات موجود، اندازه‌گیری‌های کیفیت آب زیرزمینی دو بار در سال از روش حجم‌سنجی انجام شده‌است که یکی در فصل بهار و دیگری در فصل پاییز می‌باشد. در مطالعه حاضر همچنین جهت مقایسه‌ی میزان پارامترهای دشت از استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۳۲) استفاده گردید. در زیر روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر توضیح داده می‌شود.

محاسبه روند زمانی از طریق روش‌های ناپارامتری

همانند سایر آزمون‌های آماری، روش روندیابی من‌کندال نیز بر مبنای مقایسه فرض صفر و یک بوده و در نهایت در مورد پذیرش یا رد فرض صفر تصمیم‌گیری می‌نمایند. فرض صفر این آزمون مبتنی بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌هاست و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. مراحل محاسبه آماره‌های این آزمون به شرح زیر می‌باشد:

الف: محاسبه اختلاف بین تک‌تک جملات سری با همدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر s که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$s=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}sgn(x_j-x_k) \qquad (۱)$$

که در آن: n تعداد مشاهدات و x_k و x_j داده‌های j ام و k ام سری‌اند. تابع علامت نیز با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$sgn=\begin{cases}+1 & \text{اگر } (x_j-x_k)>0\\ 0 & \text{اگر } (x_j-x_k)=0\\ -1 & \text{اگر } (x_j-x_k)<0\end{cases} \qquad (۲)$$

ب: محاسبه واریانس که از رابطه (۳) و (۴) به دست می‌آید:

(۳) اگر n>10

$$Var=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{j=1}^{m}t_it_i(t_i-1)(2t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

(۴) اگر n<10

$$Var=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که در نهایت n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m معرف تعداد سری‌هایی که در آن حداقل یک داده تکراری وجود داشته باشد و t

معرف داده‌های با ارزش یکسان می‌باشد.

ج: نهایتا مقدار آماره z توسط یکی از روابط زیر تعیین می‌گردد:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

در یک آزمون دو طرفه برای یافتن روند سری داده‌ها، فرض صفردر صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه‌ی (۶) برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}} \quad (۶)$$

که در آن: α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z آماره‌ی توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری می‌باشد، که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از $\frac{\alpha}{2}$ استفاده شده‌است. در این تحقیق آزمون من‌کندال برای سطح اطمینان ۹۹ درصد به کار گرفته شده است که مقدار $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ برابر ۲/۶۵ می‌باشد. دلیل عدم استفاده از سطح ۹۵ درصد اطمینان، نزدیکی نتایج حاصل از دو سطح اطمینان مذکور می‌باشد.

در صورت مثبت بودن آماره‌ی روند، سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته‌می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان روند می‌توان شیب تخمینی β را توسط رابطه‌ای که توسط سن (۲۷) ارائه و توسط هیرش و همکاران (۱۵) توسعه یافت محاسبه کرد. این روش همانند روش من‌کندال بر اساس مفهوم تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بنا نهاده شده‌است. رابطه به صورت زیر تعریف شده‌است:

$$\beta = \frac{x_t - x_s}{t-s} \quad (۷)$$

در این رابطه: x_t و x_s به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و s می‌باشد. به طوری‌که t یک واحد زمانی بعد از s است. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک‌سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست می‌آید که از محاسبه میانه این سری زمانی، شیب خط روند (β_{med}) حاصل می‌آید. مقدار مثبت (β_{med}) حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد (۳۱). هردو روش مذکور با استفاده از نرم افزار XLSTAT 2019 انجام گردید. همچنین برای تحلیل روند در سطح آبخوان یزد-اردکان، مقدار بزرگی روند (β_{med}) و همچنین وجود یا عدم وجود روند به دست‌آمده برای هر چاه در محیط GIS ترسیم شد.

تهیه الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی، از روش‌های مختلف درون‌یابی (قطعی و زمین‌آمار) استفاده شد. بدین منظور، روش‌های مختلف درون‌یابی در نرم‌افزارGIS با یکدیگر مقایسه و روش بهینه با توجه به RMSE کمتر و R^2 بیشتر به دست آمد. روش‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر،کریجینگ[۱]، عکس فاصله (IDW)[۲]، توابع شعاعی (RBF)[۳]، تخمین‌گر موضعی (GPI)[۴] و تخمین‌گر عام (LPI)[۵] می‌باشد. پس از انتخاب بهترین مدل جهت درونیابی هر یک از فاکتورهای کیفی، اقدام به استخراج نقشه پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای در دو سال ۱۳۷۹ و ۱۳۹۹ شد و با استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی (GQI) اقدام به استخراج نقشه شاخص مذکور شد. لازم به ذکر است فاکتورهای کیفی مورد بررسی در روند زمانی و مکانی یکسان بوده است.

توسعه شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ترکیب داده‌های آب با کیفیت‌های مختلف در دسترس را به شکلی قابل درک در می‌آورد. این شاخص ارائه‌دهنده روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است که می‌تواند به خوبی ارائه شود و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، کمک می‌کند. در نهایت این شاخص با استفاده از غلظت یون‌های مهم مانند (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{-})، کلر (Cl^{-})، سولفات ($So4^{2-}$) و کل جامدات محلول (TDS)، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود و همچنین بررسی وضعیت کلی آب زیرزمینی کمک می‌کند. مراحل محاسبه این شاخص نیز به شرح زیر می‌باشد:

نقشه اولیه

غلظت اندازه‌گیری شده درهر سلول (نقشه‌های استخراجی با کمک روش‌های مناسب درون‌یابی در مرحله قبل) و غلظت استاندارد بهداشت جهانی (۳۲) را به واسطه رابطه شاخص اختلاف نرمالیزه شده (رابطه ۸) ترکیب و داده‌ها به صورت نرم جهانی[۶] استخراج شد (۴).

$$C = \acute{X} - X/\acute{X} + X \quad (۸)$$

در این رابطه: X و $\mathring{X}$ به ترتیب غلظت استاندارد سازمان بهداشت جهانی و غلظت اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نقشه به دست‌آمده بیان‌گر فاکتورهای کیفی است که به عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت قابل پذیرش محاسبه شده است و محدوده‌ای بین ۱- تا ۱ را داراست.

1- Kriging
2- Inverse Distance Weighting
3- Radial Basis Function
4- Global Polynomial interpolation
5- Local Polynomial interpolation
6- Universal norm

نقشه رتبه‌بندی

در این مرحله، غلظت شاخص‌ها به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده بین ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین مقدار و رتبه ۱۰ بیشینه می‌باشد. می‌توان از تابع چند جمله‌ای زیر (رابطه ۹) با محدوده تغییرات ۱ تا ۱۰ استفاده کرد. در این معادله، C مقدار شاخص‌های کیفی برای هر سلول و r مقدار رتبه مربوط به آن می‌باشد (۴).

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (۹)$$

برای تعیین کلی کیفیت آب از طریق رابطه زیر، پهنه‌بندی GQI ترسیم می‌گردد.

$$GQI = 100 - \left[\frac{r_1w_1+r_2w_2+r_3w_3+\cdots+r_6w_6}{6}\right] \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق r رتبه و w وزن نسبی هر یک از پارامترها می‌باشد. وزن نسبی هر پارامتر از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید.

$$w = mean\, r + 2 \quad (۱۱)$$

برای محاسبه GQI از پارامترهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود (۱۳). وزن مختص هر پارامتر، بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی مربوط به مقدار رتبه‌بندی میانگین (نقشه رتبه‌بندی) آن است. پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. در نهایت و با تقسیم حاصل‌ضرب رتبه هر پارامتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین ۱ تا ۱۰۰ به دست می‌آید. مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به یک بیان‌گر کیفیت نامطلوب است. بدین ترتیب تاثیر پارامترها به صورت انفرادی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و محاسبه شاخص هرگز به تعداد معینی از پارامترهای شیمیایی محدود نمی‌گردد. جدول ۱ کلاس‌بندی مقادیر شاخص GQI را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

جدول ۲ آمار توصیفی پارامترهای بررسی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و غلظت‌های آستانه را بر حسب استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیان می‌دارد.

روند زمانی

شکل ۲ نشان‌دهنده وضعیت روند مشخصه‌های کیفی هر کدام از چاه‌هایی مورد بررسی است که از طریق روش‌های من‌کندال و شیب سن در سطح ۹۹ درصد انجام شد. نتایج نشان داد، در دوره آماری مورد بررسی شاخص‌های سولفات، سدیم و کل جامدات محلول در بیشتر چاه‌ها روند کاهشی داشته اما شاخص‌های کلسیم، منیزیم و کلر، به خصوص در مناطق شمالی دشت، دارای روند افزایشی بوده‌است. علارغم تراکم جمعیت در مرکز دشت، مشخصه‌های کلر، کل جامدات محلول، سولفات و سدیم در این محدوده دارای روند کاهشی و یا فاقد روند می‌باشد. بر این اساس، در آبخوان یزد_اردکان تغییرات سولفات، سدیم و TDS تا حدودی مشابه و سه پارامتر کلسیم، منیزیم و کلر نیز با هم مشابه هستند که با نتیجه خسروی و همکاران (۱۸)، دشتی برمکی و همکاران (۷) و سبزواری و زینی‌وند (۲۴) تا حدودی مطابقت دارد. طبق نتیجه پژوهش‌های ذکر شده سدیم، کلر و TDS بیشترین تاثیر را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی داشته و رویه تغییرات مشابهی دارند.

جدول ۱- طبقه بندی کیفیت آب بر اساس شاخص GQI (٤)

Table 1- Classification of water quality based on GQI

0-25	25-50	50-70	70-90	90-100	مقدار GQI GQI value
کاملا نامطبوع Completely Unsuitable	نامناسب Unsuitable	متوسط Medium	قابل قبول Acceptable	مناسب Suitable	کلاس کیفیت آب Water quality class

جدول ۲- مشخصه‌های آماری کیفیت آبخوان موردمطالعه در دوره (۱۳۹۹-۱۳۷۹)

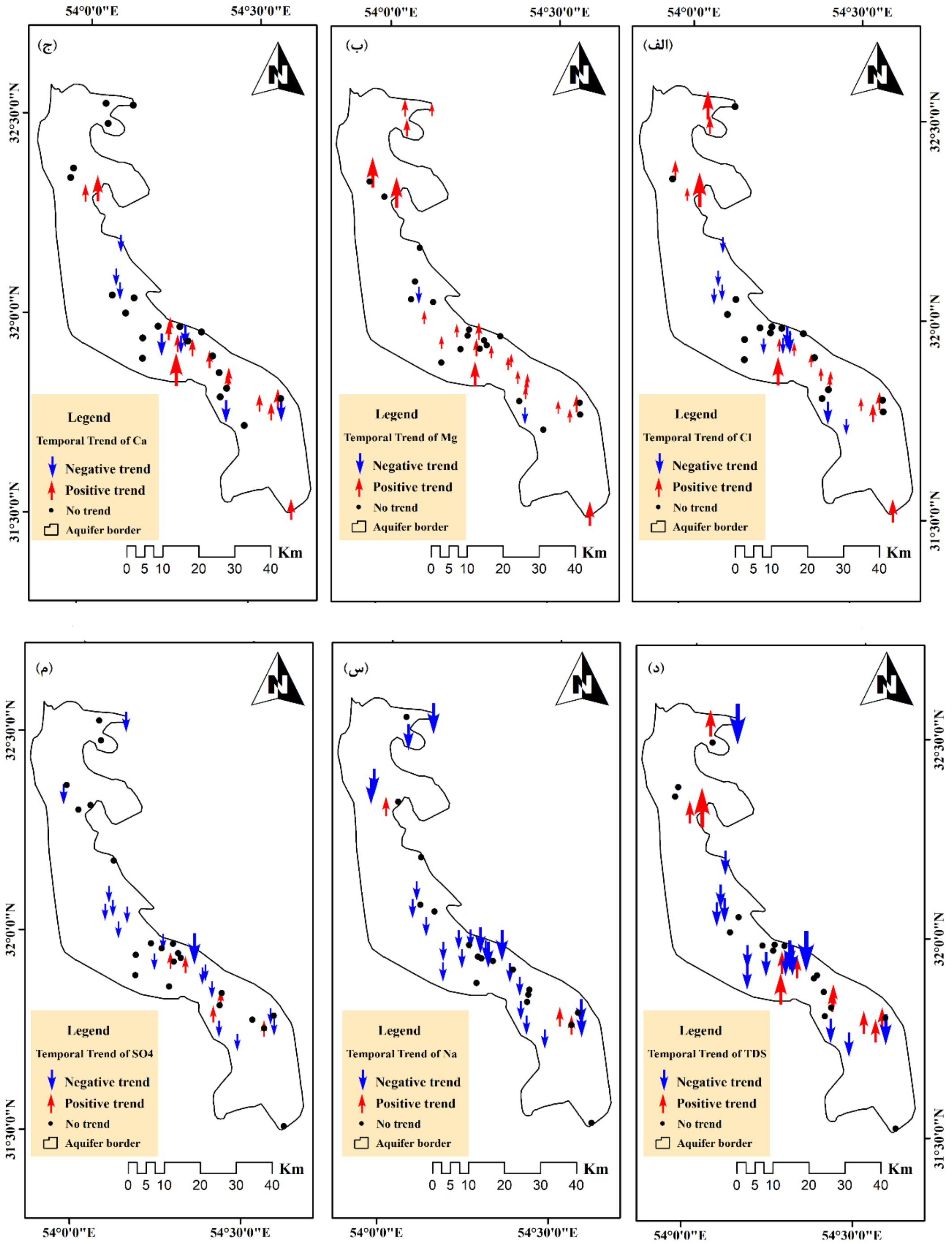
Table 2- Statistical characteristics of the aquifer water quality in the period of (2000-2020)

استاندارد آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی Drinking standard of the WHO	میانگین Average	انحراف معیار Standard deviation	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	مشخصه Characteristic
300	10.43	9.23	50.7	1.36	Ca^{2+}
300	9.92	8.99	46.56	1.18	Mg^{2+}
200	31.03	37.8	312.72	2.61	Na^{-}
200	37.03	55/68	117	2.99	Cl^{-}
250	12.34	12.35	85.32	1.51	$So4^{2-}$
600	3187.12	3152.94	13924	401	TDS

* غلظت یون‌ها برحسب ppm و کل مواد جامد محلول برحسب میلی‌گرم برلیتر می‌باشد.

* The concentration of ions is in ppm and the TDS is in milligrams per liter.

همچنین روند پارامترهای سولفات، سدیم و کل جامـدات محلـول در اکثر چاه‌های موجود در محدوده شهر یزد منفـی و یـا بـدون رونـد است. دلیل این مسئله می توان انتقال آب بین حوضه‌ای با کیفیت بالا به این منطقه می‌باشد، که توانسته علارغم برداشت‌های بیش از توان آبخوان‌ها (۸)، وضعیت پارامترهای مـذکور در ایـن محـدوده را بهبـود بخشد و یا آن را حفظ کند.



شکل ۲- روند پارامترهای کیفی آب چاه‌های مورد بررسی در آبخوان یزد- اردکان، (الف): کلر، (ب): منیزیم، (ج): کلسیم، (د): کل جامدات محلول، (س): سدیم و (م): سولفات

Figure 2– The trend of the quality parameters of the study wells in the Yazd-Ardakan aquifer, (a):chloride, (b): magnesium, (c): calcium, (d): TDS, (s): sodium (m): sulfate

جدول ۳- مقایسه روش‌های درون‌یابی با توجه به دقت برآورد در پارامترهای کیفی آبخوان مورد مطالعه

Table 3- Comparison of the interpolation methods considering the estimation accuracy of the quality parameters of the study aquifer

	کریجینگ Kriging		عکس فاصله Inverse Distance Weighting		تخمین‌گر موضعی Global Polynomial interpolation		تخمین‌گر عام Local Polynomial interpolation		توابع شعاعی Radial Basis Function	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Ca	0.091	7.927	0.477	6.012	0.139	7.716	0.402	6.427	0.467	6.069
Mg	0.313	6.296	0.441	5.636	0.040	7.446	0.077	7.299	0.439	5.693
Na	0.581	27.424	0.346	32.347	0.274	38.089	0.357	32.084	0.375	31.688
Cl	0.640	178.398	0	181.494	0.001	181.396	0.001	181.369	0	181.469
SO4	0.566	13.122	0.325	13.546	0.165	15.065	0.276	14.546	0.336	13.436
TDS	0.527	2182.537	0.494	2258.498	0.272	2709.150	0.310	2638.080	0.489	2270.146

تغییرات مکانی

برای بررسی تغییرات مکانی مشخصه‌های کیفی، ابتدا روش‌های مختلف درون یابی مورد مقایسه قرارگرفت و روش مناسب بر اساس میزان خطا و پارامترهای RMSE و R^2 انتخاب گردید (جدول ۳). بر این اساس، جهت بررسی تغییرات مکانی مشخصه‌های سدیم، کلر، سولفات و کل جامدات محلول از روش کریجینگ معمولی و کلسیم و منیزیم نیز از روش عکس فاصله استفاده شد. نتایج نشان داد روش‌های قطعی جهت پهنه‌بندی مشخصه‌های کیفی آب نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد و بهترین روش‌ها در این زمینه، روش‌های زمین‌آمار می‌باشد که با نتایج عیوضی و مساعدی (۱۱) و سبزواری و همکاران (۲۵) مطابقت دارد.

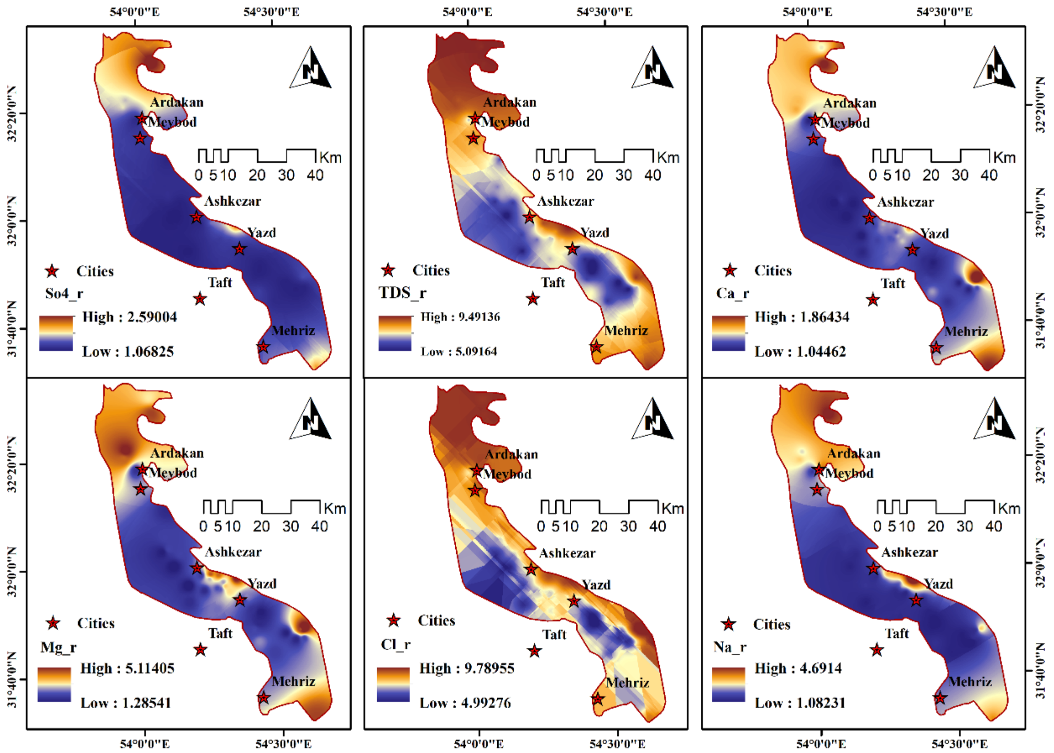
شکل‌های ۳ و ۴ توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی آبخوان مورد مطالعه برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۹را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که کمترین مقدار رتبه با رنگ آبی و بیشترین مقدار با رنگ قهوه‌ای مشخص شده‌است. در سال ۱۳۷۹ بیشترین رتبه متعلق به کلر، کل جامدات محلول (TDS) و منیزیم و کمترین رتبه را کلسیم و سولفات دارا هستند. در سال ۱۳۹۹، کلر، کل جامدات محلول (TDS) و سدیم بالاترین و سولفات و کلسیم پایین‌ترین رتبه را دارند.

نتایج مقایسه نقشه‌های رتبه‌بندی نشان می‌دهد، به جز کلسیم و منیزیم، مابقی مشخصه‌های کیفی مورد بررسی کاهشی بودند، اما این کاهش کمتر از یک واحد از رتبه‌بندی بوده‌است. در نواحی شمالی محدوده، همه پارامترها دارای بیشترین رتبه هستند در حالی که غالبا کمترین میزان رتبه پارامترها در نواحی مرکزی آبخوان قرار دارد. پارامتر TDS در انتهای دوره مورد بررسی (۱۳۹۹) نسبت به ابتدا، در قسمت‌های جنوبی و میانی به وضعیت مناسب‌تری رسیده و در محدوده شمالی تغییر قابل توجهی نداشته‌است. همچنین پارامتر مذکور کمترین تغییر را نسبت به سایرین داشته است. پارامتر منیزیم در جنوب و شرق محدوده مورد مطالعه کاهشی بوده اما در محدوده شهر یزد با شیب بسیار زیاد افزایشی بوده است. به طوریکه پارامتر منیزیم بیشترین تغییر را در بین سایر پارامترها داشته است. در رابطه با پارامترهای دیگر سولفات و کلسیم در اکثر نقاط یا کاهشی بوده و یا اینکه تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهند. از بین پارامترهای مورد بررسی منیزیم، کلر و TDS بیشترین تاثیر را بر کیفیت منابع آب زیرزمینی محدوده مورد بررسی داشته اند و با نتیجه پژوهش آلام و همکاران (۳) که در منطقه چندل کشور هندوستان انجام شده‌است مطابقت دارد. خسروی و همکاران (۱۸) و دشتی برمکی و همکاران (۷) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدندکه سه پارامتر کلر، سدیم و TDS بیشترین اثرگذاری را بر کیفیت آب زیرزمینی دارد که نتیجه پژوهش حاضر تا حدود زیادی با نتایج پژوهش‌های مذکور نیز مطابقت دارد.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

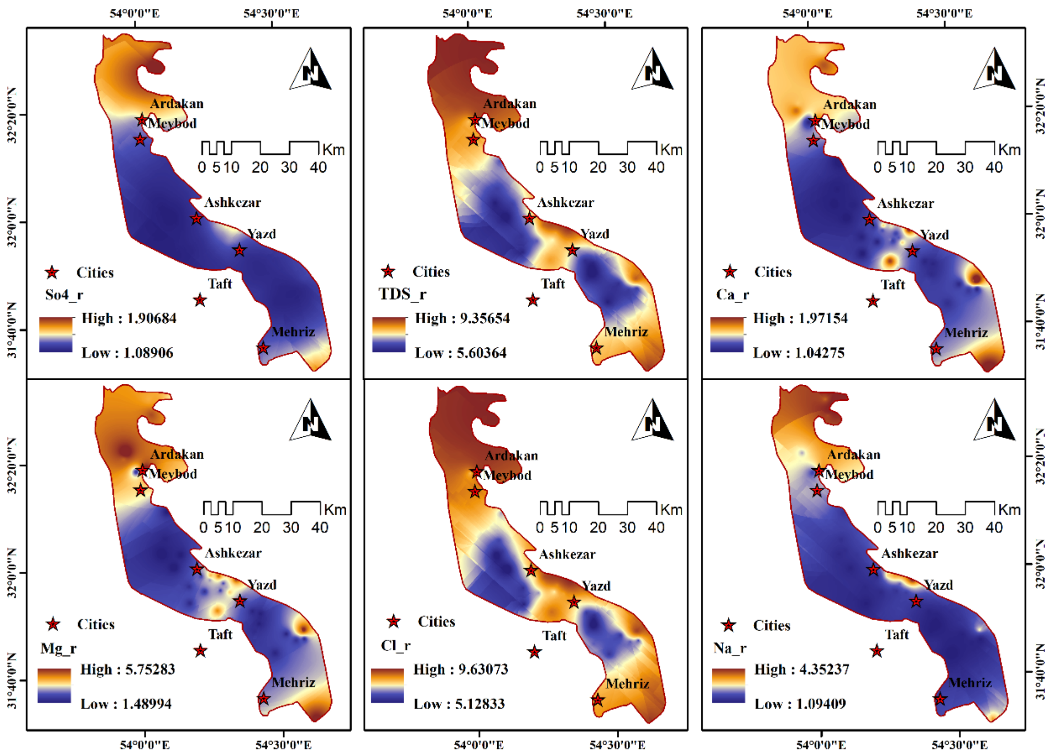
شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی شاخص GQIمربوط به ابتدا و انتهای دوره زمانی و تغییرپذیری آن در آبخوان یزد- اردکان می‌باشد. بر اساس این نقشه و بازه تغییرات مقدار GQI، قسمتی از آبخوان در کلاس متوسط و قسمتی در کلاس قابل قبول قرار دارد. در نواحی شمالی کیفیت پایین‌تر از سایر نواحی دشت می‌باشد. دلیل این امر، وجود حداکثر غلظت پارامترهای کیفی در این نواحی از آبخوان می‌باشد. یکی از مهمترین دلایل کاهش کیفیت در شمال آبخوان مورد مطالعه می توان به واقع شدن این محدوده در مجاورت کویر چاه افضل اشاره کرد. با برداشت آب در بالادست جبهه آب شور کویر چاه افضل به سمت آبخوان مورد مطالعه حرکت کرده و کیفیت آب را به شدت کاهش می دهد.

به منظور تحلیل تغییرپذیری کیفیت آب زیرزمینی، در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹ با توجه به نقشه‌های GQI ابتدا (GQI_t) و انتهای دوره (GQI_{t+1}) مطالعاتی از رابطه (۱۱) استفاده شد و تغییرات کیفیت آب زیرزمینی تعیین گردید (۲۷). نتیجه نشان داد تغییرات شاخص GQI بین ۱۰- تا ۵/۵ درصد متغییر است. منفی به معنی کاهش و مثبت به معنی افزایش کیفیت منابع آب می‌باشد.



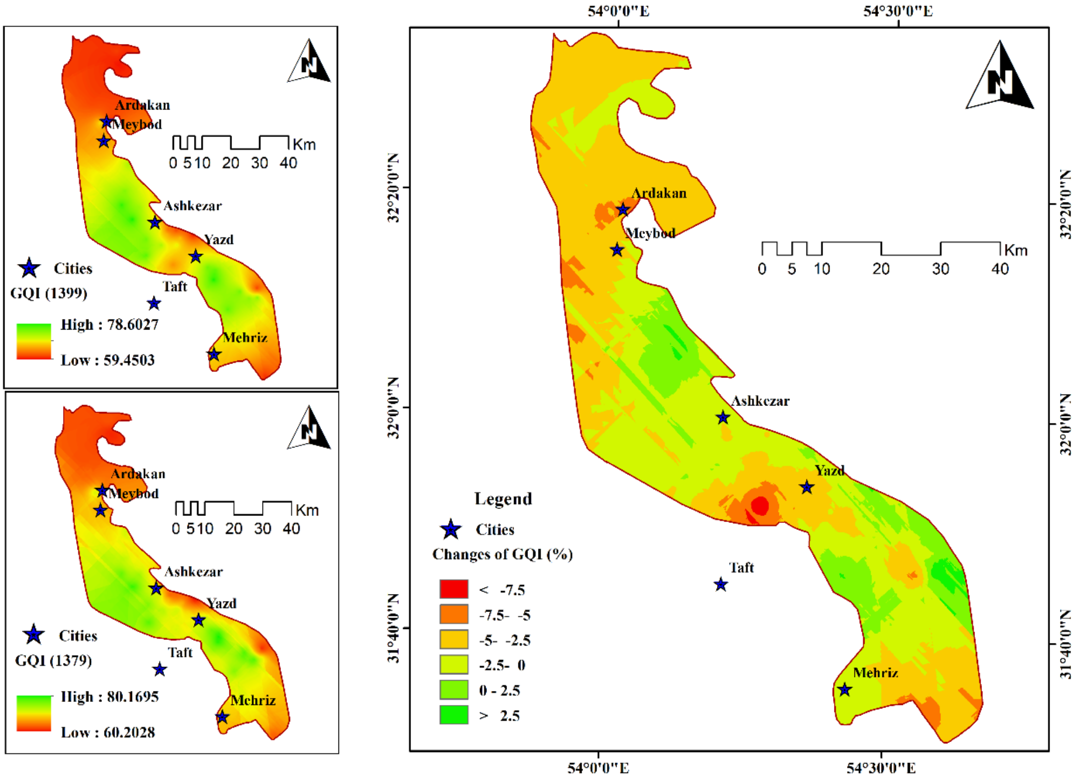
شکل ۳– توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی دشت مورد مطالعه در سال ۱۳۷۹

Figure 3- Spatial distribution of qualitative characteristics of the studied plain in 2000



شکل ٤– توزیع مکانی رتبه‌بندی مشخصات کیفی دشت موردمطالعه در سال ۱۳۹۹

Figure 4- Spatial distribution of qualitative characteristics of the studied plain in 2020



شکل ۵- پهنه‌بندی GQI و میزان تغییرات آن در دوره ۱۳۹۹-۱۳۷۹

Figure 5- GQI zoning and its changes in the period of 2000-2020

به‌طوری‌که بیشترین تغییرات منفی کیفیت مربوط به محدوده شهر یزد، تفت، میبد، اردکان و مناطق شمالی (کویر چاه‌افضل) بوده، که این موضوع نشان‌دهنده مصرف بالای آب زیرزمینی در این ناحیه و مجاورت با چاله کویری و شور چاه افضل می باشد و بیشترین تغییرات مثبت کیفیت مربوط به بخش مرکزی و جنوبی آبخوان می‌باشد.

$$[(GQI_{t+1} - GQI_t)/GQI_t] \times 100 \qquad (۱۲)$$

نتیجه‌گیری

مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در پژوهش حاضر نشان داد، روش‌های زمین‌آمار می‌تواند در پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی بهتر از روش‌های قطعی عمل کندو بهترین روش‌ها در این زمینه، روش‌های کریجینگ و عکس فاصله می‌باشد که با نتایج پژوهش‌های مورد بررسی مطابقت دارد.کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی دراین پژوهش نشان داد که کیفیت کلی آبخوان یزد_اردکان در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در رده‌ی متوسط و قابل قبول قراردارد و کاهش کیفیت در این دوره وجود داشته اما بسیار کم بوده است.

همچنین در بحث تاثیر مثبت آب بین حوضه‌ای بر کیفیت آب زیرزمینی در محدوده شهر یزد که دارای تراکم جمعیتی بالاتری نسبت به سایر مناطق نیز هست، نتایج روند زمانی حاکی از این است که چاه‌های موجود در این محدوده در سه پارامتر سولفات، سدیم و TDS دارای روند منفی قابل ملاحظه و یا بدون روند بودند. همچنین نقشه‌های رتبه‌بندی بیانگر تاثیر بالای پارامترهای TDS، کلر و منیزیم بر تعیین شاخص کیفی آب زیرزمینی می‌باشند، که در محدوده شهر یزد دارای روند مثبت بوده‌اند. به همین دلیل نقشه تغییرپذیری شاخص کیفیت آب زیرزمینی نتوانست روند زمانی منفی و نقشه‌های پهنه‌بندی را تایید کند. این مسئله نشان می‌دهد، استفاده از شاخص‌های کیفی می‌تواند تاثیرات پارامترها نسبت به یکدیگر را خنثی کند و نتیجه بهتر و قابل قبولی را ارائه دهد.

نتایج نهایی پژوهش حاضر نشان داد، آب انتقالی با کیفیت مناسب توانسته افزایش میزان کل جامدات محلول، سولفات و سدیم را کنترل کند و موجب افزایش کلر در این مناطق شود اما تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده پارامترهای اندازه‌گیری شده، به‌طور کلی توصیف کیفیت آب،امری دشواراست؛ بنابراین استفاده از شاخص‌های کیفیت آب می‌توانند شرایط کلی کیفیت آب را به‌طور خلاصه و قابل درک ارائه کند.

منابع

1- Abdollahi A., and Balajeh F. 2020. Potentiometric zoning of groundwater resources of Yazd-Ardakan plain. Journal of the Geographical Engineering of Territory 3(6): 135-149. (In Persian)
2- Alipour A., Rahimi J., and Azarnivand A. 2017. Groundwater Quality Analysis for Drinking and Agricultural Purposesa Prerequisite for Land Use Planning in the Arid and Semi-arid Regions of Iran. Journal of Range and Watershed Managment 70(2): 423-434. (In Persian with English abstract)
3- Alam W., Singh K.S., Gyanendra Y., Laishram R.J., and Nesa N. 2020. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality for few habitations of Chandel District, Manipur (India). Applied Water Science 10: 123.
4- Babiker I.S., Mohamed M.A.A., and Hiyama T. 2007. Assessing groundwater quality using GIS, Water Resources Management 21: 699–715.
5- Chenini I., and Khemiri S. 2009. Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. International Journal of Environment Science and Technology 6(3): 509-519.
6- Cordoba E., Martinez A., and Ferrer E. 2010. Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacionhidrografica del jucar (Spain). Ecological Indicators (10): 1049-1054.
7- DashtiBarmaki M., Rezaei M., and Saberi Nasr A. 2014. Assessment of groundwater quality index (GQI) for Lenjanat aquifer using GIS. Journal of Engineering Geology 8(2): 2121-2138. (In Persian with English abstract)
8- Dehghan A., Azizian A., Yarami N., Tazeh M., and Amirbeygi M. 2020. Investigation of the Quality and Quantity of Groundwater Resources and their Relationship with the Geological Formations (Case Study: Yazd-Ardakan Basin). Water and Soil Science 30(3): 75-91. (In Persian with English abstract)
9- Dustmohammadian A.H., Mohammady M., Amiri M., and Kianian M.K. 2021. Investigating Temporal Changes of Groundwater Quality in Semnan Plain Using Geostatistical Method, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering 14(51): 59-62. (In Persian with English abstract)
10- El Baba M., Kayastha P., Huysmans M., and De Smedt F. 2020. Evaluation of the Groundwater QualityUsing the Water Quality Index and Geostatistical Analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine.Water 12(1): 262.
11- Elamassi K.S. 2012. Assessment of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in Gaza governorate-Palestine. The Islamic University-Gaza., Faculty of Science, Master's Degree Program, Environmental science.
12- Eyvazi M., and Mosaedi A. 1391. Investigation of spatial pattern of precipitation in Golestan province using definite and geostatistical models.Water and Soil 26(1).
13- Grzywna A., and Bronowicka-Mielniczuk U. 2020. Spatial and Temporal Variability ofWater Quality in the Bystrzyca River Basin, Poland. Water 12(1): 190. (In Persian with English abstract)
14- Hiyama T. 2010. Evaluation of groundwater vulnerability (and susta inability). 20th UNESCO. IHP training course.
15- Hirsch Robert M., Slack James R., and Smith Richard A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research 18(1).
16- Ibrahim M.N. 2019. Assessing Groundwater Quality for Drinking Purpose in Jordan: Application of Water Quality Index. Journal of Ecological Engineering 20(3).
17- Kendall M.G. 1975. Rank Correlation Measures, Charles Griffin Inc. London.
18- Kundzewicz Z.W. 1997. Water resources for sustainable development.Hydrological Sciences Journal 42(4): 467-480.
19- Khosravi H., Heydari E., Zehtabian G., and Bazrafshan J. 2016. Analysis of spatial and temporal trends of groundwater index (GRI) (Case study: Yazd-Ardakan plain) 22(4): 711-720. (In Persian)
20- Mann H.B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend, Econometrica 13: 245-259.
21- Mohammadi E., Ahmad pari H., Zolfagharan A., and Dehghan A. 2021.Investigation of quantity and quality of groundwater resources in Momenabad watershed of Semnan. Journal of New Approaches in Basic Sciences, Technical and Engineering Research 3(11): 47-66. (In Persian with English abstract)
22- Nasseri M., Monem M J., Shahverdi K., and Afsous M. 2021. Zoning of Bamdej Wetland Water Quality based on the Spatio-temporal Kriging. Wetland Ecobiology 2020: 12(2). (In Persian)
23- Nouraki A., and Hooshmand A. 2021. Evaluation of trend and spatial distribution pattern of groundwater quality using water quality indices (Case study: Hamedan-Bahar plain). Journal of Environmental Science and Technology. (In Persian)
24- Parsaie F., Mahmoodi M.A., and Egdernezhad A. 2020. Assessment of Groundwater Quality for Drinking and Agriculture in Qorveh Plain. Wetland Ecobiology. 2021; 12(1). (In Persian with English abstract)
25- Sabzevari Y., and Zeinivand H. 2020. Assessing the Trend and Quality Classification of Groundwater Resources in Boroujerd – Dorod plain. Wetland Ecobiology 12(3):101-116. (In Persian with English abstract)

26- Sabzevari Y., Nasrolahi A., and Yonesi H. 2020. Investigation of temporal-spatial variations of groundwater resources quality in Borujerd-Dorood Plain. Irrigation and Water Engineering 11(1): 150-167. (In Persian with English abstract)
27- Sen Paranab Kumar. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association 63: 1379-1389.
28- Smiraglia D.T., Ceccarelli S., Bajocco L., and Perini L. 2016. Linking trajectories of land change, land degradation processes and ecosystem services. Environmental Research 147: 590-600.
29- Sun X., Zhang H., Zhong M., Wang Z., Liang X., Huang T., and Huang H. 2019. Analyses on the Temporal and Spatial Characteristics of Water Quality in a Seagoing River Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study in the Duliujian River, China. International Journal of Environment and Research Public Health 16: 1020.
30- Torabipoudeh H., Yonesi H., and Arshia A. 2020. Evaluation of Quality Changes in the Groundwater Resources and IRWQIGC Upstream of Zayandehrood Dam. Desert Ecosystem Engineering Journal 24(2) :27-40. (In Persian)
31- Vafakhah M., BakhshiTiragani M., and Khazaei M. 2013. Analysis of Rainfall and Discharge Trend in Kashafrood Watershed. Geography And Development Iranian Journal 10(29): 77-90. (In Persian with English abstract)
32- Wang J., Xiao W., Wang H., Chai Z., Niu C., and Li W. 2013. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. Chinese Science Bulletin 58(27): 3340-3347.
33- WHO, World Health Organization. 2004. Guidelines for drinking-water quality, 1, 3rdedn, recommendations.WHO, Geneva,Switzerland.
34- YonesiH., Arshia A., Torabipoudeh H., Shahinejad B., Sayedipour M., and Vahdatpour N. 2020. Evaluating Groundwater Quality in Zayandehrood Southern Sub- Basin Aquifers, Desert Ecosystem Engineering Journal 9(26): 103-115. (In Persian with English abstract)
35- Zhang Q., Wang L., Wang H., Zhu X., and Wang L. 2020. Spatio-Temporal Variation of Groundwater Quality and Source Apportionment Using Multivariate Statistical Techniques for the Hutuo River Alluvial-Pluvial Fan, China. International Journal of Environ and Reserch Public Health, 17, 1055.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 6, Feb.-Mar. 2022, p. 791-804

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۴۰۰، ص. ۸۰۴-۷۹۱

Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer)

H. Sarvi Sadrabad[1]- A. Zare Chahouki[2]*
Received: 16-08-2021
Accepted: 28-10-2021

Introduction: Inter-basin water transfer affects the environment, culture and economy of donor and recipient basin. In this regard, one of the most important aspects are the positive and negative effects on the quality of groundwater in the recipient basin. Spatio-temporal changes of groundwater quality as the results of inter-basin water transfer, plays an important role in water resources management. Thus, this study attempts to investigate the temporal trends of groundwater quality parameters using Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. In addition, spatial changes of groundwater quality and the effects of inter-basin water transfer were studied.

Materials and Methods: In this study, non-parametric methods and interpolation models were used to evaluate the spatio-temporal patterns of groundwater quality parameters in the Yazd-Ardakan plain. Mann-Kendall nonparametric test and Sen's slope were used to examine the temporal trends in the span of 2000 to 2020. The interpolation models and groundwater quality index (GQI) were used to study the spatial patterns and classify the quality of groundwater. The assessment of quality parameters of all studied wells including Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, Na^+, SO_4^{2-} and TDS were studied in equal time periods. Groundwater quality measurements were performed twice a year using a volumetric method, one in spring and the other one in autumn. The World Health Organization (WHO) standard was considered to compare values of different parameters in the plain.

Results and Discussion: A decreasing trend was observed in SO_4^{2-}, Na^+ and TDS parameters in most wells and there was an increasing trend for Ca^{2+}, Mg^{2+} and Cl^- parameters. Considering WHO classification standard, all the studied parameters were in the allowable ranges except TDS. The parameter ranking showed that TDS, Cl^- and Mg^{2+} had the greatest impact on the quality of aquifer groundwater. The Mg and TDS parameters had the highest and the lowest changes, respectively during 2000 to 2020. Results of the GQI showed that the total quality of the Yazd-Ardakan aquifer was in the moderate class and acceptable because of relatively large decrease in the groundwater in the span of the studied period. However, the decrease in groundwater quality was negligible. Changes of the quality map showed that the most negative quality changes were related to the Yazd, Taft, Meybod, Ardakan and northern regions (Chah-Afzal desert). This indicates high groundwater pumping in these areas and being located near the desert area. The most positive quality changes belonged to the central and southern part of the aquifer.

Conclusion: Comparison of the interpolation models showed that the geostatistical methods can show better results than the definitive methods in zoning groundwater quality parameters. The Kriging and IDW models were the best models and consistent with the results of the research. The quality of groundwater was acceptable, while the reduction in quality was very low and negligible in the Yazd-Ardakan aquifer during the studied period. The temporal trends of SO_4^{2-}, Na^+ and TDS had either a negative significant trend or no trend in the Yazd area. Considering ranking maps, TDS, Cl^- and Mg^{2+} had high impacts on determining the GQI. These trends were positive in Yazd city and consequently the GQI maps could not confirm the negative temporal trend and zoning maps. This finding showed that the use of qualitative indicators could neutralize the effects of the parameters on each other and provide a better and acceptable result. In all, the transfer water with appropriate

1- Ph.D. Student, Department of Watershed, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University
2- Assistant Professor, Department of Watershed , Faculty of Natural Resources, Yazd University
(*- Corresponding Author Email: zare.chahouki@yazd.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2021.71571.1073

quality could control the increase of the TDS, SO_4^{2-}, Na and caused an increase in Cl^- in these areas. There are many effective factors to study water quality, so its description seems to be difficult. Therefore, using water quality indicators can provide total water quality conditions in a concise and understandable way.

Keywords: Groundwater quality index, Mann-Kendal, Sen's slope, Water transfer Yazd_Ardakan